

Scientific journal  
**PHYSICAL AND MATHEMATICAL EDUCATION**  
Has been issued since 2013.

ISSN 2413-158X (online)  
ISSN 2413-1571 (print)



Науковий журнал  
**ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА ОСВІТА**  
Видається з 2013.

<http://fmo-journal.fizmatsspu.sumy.ua/>

*Роечко О.Ю. Оценка вероятности образования отрицательных ионов водорода в поверхностно – плазменном методе генерации с помощью уравнения Рассера // Фізико-математична освіта : науковий журнал. – 2016. – Випуск 2(8). – С. 103-107.*

*Royenko O. Estimating the probability of the formation of negative hydrogen ions in the surface - a plasma method using Rasser equation // Physics and Mathematics Education : scientific journal. – 2016. – Issue 2(8). – P. 103-107.*

УДК 537.563.7

О.Ю. Роечко

Институт прикладной физики ИПФ НАН Украины, Украина

# **ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА В ПОВЕРХНОСТНО – ПЛАЗМЕННОМ МЕТОДЕ ГЕНЕРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЯ РАССЕРА**

## **Введение**

Для увеличения получаемого тока отрицательных ионов в источниках отрицательных ионов наряду с объемным методом генерации все чаще пытаются применять поверхностный метод. На текущий момент понимание данного метода состоит в том, что при взаимодействии атомов и молекул водорода в поверхность с малой работой выхода, электроны, находящиеся в поверхностном слое металла могут туннелировать на адсорбированную на поверхности частицу и образовывать отрицательный ион. Многие исследователи сообщают[3,4] об удачном применении поверхностно – плазменного метода в своих экспериментах по увеличению плотности Н- тока. Применение этого метода существенно увеличивает получаемую плотность тока отрицательных ионов, по некоторым результатам, до 4 раз[4], а также сильно способствует уменьшения извлекаемого вместе с ионным пучком электронного тока до соотношений  $I_e/I_i=10$  и меньше.

В большинстве случаев применения поверхностно – плазменного метода для снижения работы выхода поверхности применялся цезий, который, при оптимальном слое его на поверхности, существенно уменьшает ее работу выхода. Например, работа выхода молибденовой поверхности равна  $\varphi \approx 4,6$  эВ, при покрытии ее цезием снижается до значений  $\varphi \approx 1,4 - 1,6$  эВ. Но, как известно, для многих применений источников отрицательных ионов, особенно в источниках для ускорителей частиц, использования цезия избегают, по причине того, что вместе с извлекаемым пучком отрицательных ионов в ускорительную камеру попадают пары цезия, нанося ущерб работе ускорителей и являясь существенным фактором возникновения пробоев.

Для оценки эффективности образования отрицательных ионов водорода на поверхности используется формула Рассера, дающая значение вероятности образования отрицательных ионов в зависимости от работы выхода поверхности. В этой работе был произведен подсчет вероятности образования отрицательных ионов в поверхностно – плазменном методе для различных значений работы выхода поверхности  $\varphi = 1,4 - 3$  эВ и энергии образованных частиц, с целью анализа возможности применения альтернативных цезию материалов для уменьшения работы выхода поверхности для увеличения тока Н<sup>-</sup> ионного пучка.

## **1. Описание методов исследования**

Оценка вероятности образования отрицательных ионов водорода в поверхностно – плазменном методе осуществляется с использованием уравнения Рассера[2]:

$$P = \frac{2}{\pi} \exp \left[ \frac{-\pi(\varphi - E_a)}{2av} \right] \quad (1)$$

где  $\phi$  – работа выхода поверхности,  $E_a$  – энергия сродства атома с электроном,  $a$  – константа экранирования атома водорода,  $v$  – скорость частиц, отлетающих от поверхности, на которой образуются отрицательные ионы.

Как показано в работах некоторых авторов[1], работа выхода электронов с поверхности металла  $\phi$  при нанесении на нее материала с малой работой выхода, чаще всего цезия, изменяется нелинейно в зависимости от толщины нанесенного слоя, выраженного в моно слоях. Например, при покрытии молибденовой поверхности ( $\phi \approx 4,6$  эВ) шаром цезия ( $\phi = 1,8$  эВ), наименьшая работа выхода в значении  $\phi = 1,4$  эВ достигается при показаниях в 0,6 моно слоя. Для исследуемого нами водорода, мы используем известное табличное значение энергии сродства  $E_a = 0,75$  эВ. Константа экранирования  $a$  варьируется у разных исследователей, в наших расчётах мы руководствовались типичным значением [5]  $a = 2,6 \cdot 10^{-5}$  эВ см.

Что касается величины скорости  $v$  отлета частиц от поверхности, находящейся в знаменателе экспоненты, то в наших расчетах величина этой скорости подсчитывалась из следующих соображений: на поверхности, где реализуется поверхностно – плазменный механизм адсорбируются налетающие на нее частицы водорода. Если этими частицами являются молекулы, то они с большой вероятностью диссоциируют на атомы, которые и составляют основной компонент адсорбированного слоя. Далее в работу включается поверхностно – плазменный механизм образования отрицательного иона – находясь на поверхности, атом может захватить в свою структуру дополнительный электрон с поверхности, образовав отрицательный ион. Но в состоянии, когда частица находится на поверхности, нельзя точно говорить о том, является этот внешний электрон принадлежащим поверхности или же атому, потому что он постоянно «циркулирует» с поверхности на атом и наоборот. И в этом случае суть вероятности образования отрицательного иона на поверхности состоит в том, отойдет ли частица от поверхности металла в тот момент, когда этот дополнительный электрон будет в ее структуре, или же в поверхности. Если в момент времени ухода частицы с поверхности электрон будет в ее составе, то можно говорить об образовавшемся отрицательном ионе, извлеченном с поверхности, если нет – то отлетает атом. Именно эта скорость «отлета» от поверхности и учитывается в выражении Рассера. Для ее оценки можно применить 2 подхода: 1) отлетающие частицы приобретают скорость для ухода от поверхности благодаря высокой температуре поверхности; 2) кинетическую энергию для ухода с поверхности частица получает при соударении с другой налетающей на поверхность частицей. Первый случай можно рассматривать в случае, когда температура поверхности довольно высокая, в полторы – две тысячи градусов, тогда вероятность образования отрицательных ионов по формуле Рассера имеет более менее существенное значение.

В источнике отрицательных ионов, разрабатываемом в ИПФ НАН Украины г. Сумы температура поверхности, где будет реализовываться поверхностно – плазменный метод ожидается на уровне не больше нескольких сот градусов, поэтому в нашем случае указанный выше механизм десорбции не работает. Что касается «выбивания» частиц с поверхности под действием налетающего потока частиц, то в своих подсчетах мы рассматриваем идеализированную ситуацию, когда между налетающей частицей и адсорбированным на поверхности атомом происходит упругое столкновение, в результате которого энергия налетающей на поверхность частицы: протона  $H^+$ , молекулярных ионов  $H_2^+$  и  $H_3^+$  переходит к отлетающей от поверхности частице. Следовательно, в нашем случае, подсчет скорости отлетающей частицы сводится к подсчету скорости налетающей на поверхность частицы, которая зависит от силы ускоряющего поля вблизи поверхности.

В нашем случае в зависимости от выбора конструкции источника, реально воплотить такие варианты конструкции, в одном из которых эта температура налетающих частиц будет равна приблизительно  $T = 300$  эВ, в другом варианте конструкции, благодаря созданию разности потенциала между анодом и плазмой  $T = 10$  эВ. Именно эти значения и используются для оценки средней скорости частиц из выражения для средней скорости:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (2)$$

В расчетах оценивались вклады в вероятность образования отрицательных ионов потоков частиц  $H^+$ ,  $H_2^+$  и  $H_3^+$ . Нашей целью является теоретически оценить вероятность образования отрицательных ионов при использовании различных материалов, которые снижат значение работы выхода поверхности приблизительно до таких значений  $\phi = 2; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8$  и 3 эВ и, соответственно, проверить целесообразность использования таких материалов в разрабатываемом источнике.

## 2. Описание и анализ результатов

Проведенная оценка вероятности образования отрицательных ионов водорода в поверхностно – плазменном методе генерации показала следующее. В случае вклада в образование отрицательных ионов из потока налетающих протонов  $H^+$  получены результаты:

Таблица 1

Вероятность образования отрицательных ионов водорода с потока протонов $H^+$		
Работа выхода $\varphi$ , эВ	Вероятность, $P$ При температуре $T = 300$ эВ	Вероятность, $P$ При температуре $T = 10$ эВ
1,4	0.55	0.29
2	0.48	0.14
2,2	0.46	0.11
2,4	0.44	0.09
2,6	0.42	0.07
2,8	0.4	0.05
3	0.38	0.04

Для потока молекулярных ионов  $H_2^+$  вероятность образования отрицательных ионов следующая:

Таблица 2

Вероятность образования отрицательных ионов водорода с потока протонов $H_2^+$		
Работа выхода $\varphi$ , эВ	Вероятность, $P$ При температуре $T = 300$ эВ	Вероятность, $P$ При температуре $T = 10$ эВ
1,4	0,52	0,21
2	0,43	0,07
2,2	0,4	0,05
2,4	0,38	0,04
2,6	0,36	0,026
2,8	0,34	0,02
3	0,31	0,012

И, наконец, для потока налетающих положительных молекулярных ионов  $H_3^+$  получены такие результаты:

Таблица 3

Вероятность образования отрицательных ионов водорода с потока протонов $H_3^+$		
Работа выхода $\varphi$ , эВ	Вероятность, $P$ При температуре $T = 300$ эВ	Вероятность, $P$ При температуре $T = 10$ эВ
1,4	0,5	0,16
2	0,4	0,047
2,2	0,37	0,031
2,4	0,34	0,019
2,6	0,32	0,013
2,8	0,3	0,009
3	0,28	0,006

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что вероятность образования отрицательных ионов водорода в поверхностно – плазменном методе принимает существенные значения при высоких энергиях участвующих в процессе частиц, с энергиями в несколько сот электронвольт, в нашем случае 300 эВ. При такой энергии значение вероятности образования отрицательного иона находится близко к 50%.

#### Выводы

В работе была произведена оценка вероятности генерации отрицательных ионов водорода в поверхностно – плазменном методе с помощью выражения Рассера. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с другими оценками[4] и ясно показывают, что вероятность образования отрицательных ионов существенно зависит от работы выхода поверхности и скорости налетающих частиц. Был проведен теоретический анализ вероятностей образования отрицательных ионов для таких возможных значений работ выхода поверхности:  $\varphi = 1,4; 2; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8$  и 3 эВ. Максимального значения вероятность  $P$  достигает для  $\varphi = 1,4$  и с увеличением работы выхода падает до значений меньше 1%. Вероятность также тем выше, чем больше скорость участвующих в поверхностно –

плазменном методе частиц. При больших скоростях налетающих на поверхность частиц, в нашем случае, средней скорости движения частицы с энергией  $E = 300$  эВ, достигается наибольшая из произведенных оценок вероятность в 55%:

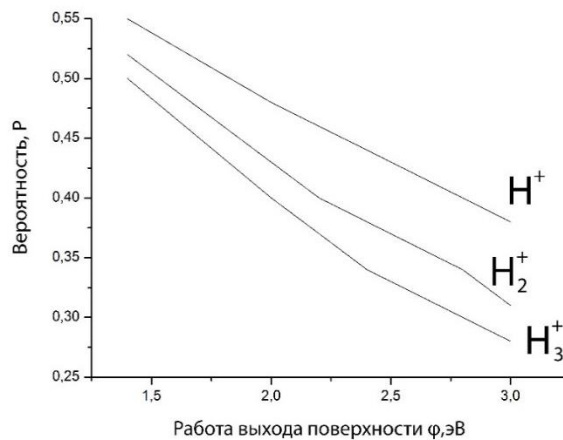


Рис. 1. Вклад в вероятность образования отрицательных ионов водорода потоков частиц  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  при  $E = 300$  эВ

Для другого варианта реализации поверхностно – плазменного метода в источнике  $H^-$  ионов с энергиями частиц в диапазоне 10 эВ, вероятность образования отрицательных ионов существенно уменьшается:

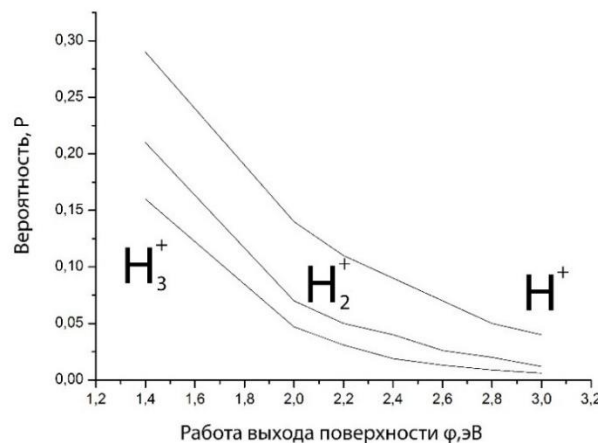


Рис. 2. Вклад в вероятность образования отрицательных ионов водорода потоков частиц  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  при  $E = 10$  эВ

#### Список использованных источников

1. R. McAdams, E. Surrey – Surface Production of Negative Ions by Positive Ions and Atoms in the Electron Suppressor Region, AIP Conf. Proc. 1097, 89 (2009); doi: 10.1063/1.3112553
2. B Rasser et al., Surf.Sci. 118,697-710 (1982)
3. R F Welton et al. "Enhancing surface ionization and beam formation in volume type H- sources" in Proceedings of the European Particle Accelerator Conference Paris 2002
4. M.P. Stockli- Volume and Surface-Enhanced Volume Negative Ion Sources, Spallation Neutron Source, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37830, USA
5. Гюнтер Х. Введение в курс спектроскопии ЯМР: Пер. с англ. – М.; Мир, 1984. – 32 стр.

**Анотація. Роєнко О.Ю. Оцінка вірогідності утворення негативних іонів водню в поверхнево – плазмовому методі генерації з допомогою виразу Рассера.**

Для оцінки ймовірності утворення негативних іонів водню в джерелі негативних іонів з комбінованим методом отримання негативних іонів було проведено розрахунки за рівнянням Рассера для визначення ймовірності генерації негативних іонів водню в поверхнево плазмовому методі для різних значень роботи виходу поверхні. Підрахунки, в гарній відповідності до існуючої теорії про принцип

реалізації поверхнево - плазмового методу, показали експонентну залежність ймовірності утворення негативних іонів при зменшенні роботи виходу поверхні.

Була проведена оцінка необхідних для використання в виразі Рассера параметрів з урахуванням допустимо можливих в джерелі негативних іонів, що розробляється в інституті прикладної фізики ІПФ НАН України м Суми. Залежно від вибору конструктивних особливостей джерела, проведені підрахунки ймовірності утворення негативних іонів для двох варіантів реалізації поверхнево плазмового методу.

**Ключові слова:** джерело негативних іонів, поверхнево - плазмовий метод, негативні іони, ймовірність утворення негативних іонів, робота виходу поверхні, рівняння Рассера.

**Аннотация. Роечко О.Ю. Оценка вероятности образования отрицательных ионов водорода в поверхностно – плазменном методе генерации с помощью уравнения Рассера.**

Для оценки вероятности образования отрицательных ионов водорода в источнике отрицательных ионов с комбинированным методом получения отрицательных ионов было произведено расчеты по уравнению Рассера для определения вероятности генерации отрицательных ионов водорода в поверхностно плазменном методе для различных значений работы выхода поверхности. Подсчеты, в хорошем соответствии с существующей теорией о принципе осуществления поверхностно – плазменного метода, показали экспоненциальную зависимость вероятности образования отрицательных ионов при уменьшении работы выхода поверхности.

Была проведена оценка необходимых для использования в выражении Рассера параметров с учетом допустимо возможных в источнике отрицательных ионов, разрабатываемом в институте прикладной физики ИПФ НАН Украины г. Сумы. В зависимости от выбора конструктивных особенностей источника, проведены подсчеты вероятности образования отрицательных ионов для двух вариантов реализации поверхностно плазменного метода.

**Ключевые слова:** источник отрицательных ионов, поверхностно – плазменный метод, отрицательные ионы, вероятность образования отрицательных ионов, работа выхода поверхности, уравнение Рассера.

**Abstract. Royenko O. Estimating the probability of the formation of negative hydrogen ions in the surface - a plasma method using Rasser equation.**

To assess the probability of the formation of negative hydrogen ions in the negative ion source with a combined method of producing negative ions produced calculations by Rasser equation for determining likelihood of generating negative hydrogen ions in the surface ionization method for different values of the work function of the surface. The calculations, in good agreement with the existing theory about the implementation of the principle of surface - plasma method, showed an exponential dependence of the probability of negative ions with a decrease in work output surface.

Was assessed necessary for use in the expression Rasser parameters taking into account permissible possible to the source of negative ions being developed at the Institute of Applied Physics, Institute of Applied Physics of the NAS of Ukraine, Sumy. Depending on the choice of the design features of the source, carried out calculations of the probability of the formation of negative ions to the two embodiments of the surface of the plasma method.

**Keywords:** negative ion source, surface - plasma method, negative ions, the probability of generation negative ions, the work function of surface, the Rasser equation.